

Системы спутникового дистанционного зондирования малых газовых компонент атмосферы

А. А. Тронин, Г. М. Неробелов, М. П. Васильев

*Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр РАН
Санкт-Петербург, 199178, Россия
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru*

Среди малых газовых компонент атмосферы выделяется группа газов и примесей — загрязнителей атмосферного воздуха: аэрозоль, диоксиды азота и серы, формальдегид и оксид углерода. Измерение параметров этих загрязнителей имеет большое значение для характеристики экологических и биогеохимических процессов в тропосфере и мониторинга качества воздуха. В последние десятилетия развивается система дистанционных методов получения информации о загрязнении атмосферы, основанная на приборах дистанционного зондирования Земли. В обзоре рассмотрено состояние технических средств дистанционного зондирования Земли для измерения малых газовых компонент тропосферы. Проанализировано развитие аппаратуры, устанавливаемой на солнечно-синхронных и геостационарных спутниках, приведены спектральные, пространственно-временные и технические характеристики приборов. Результаты анализа показали, что в настоящее время отмечается тенденция к построению трёхуровневой системы наблюдений, включающей геостационарные спутники, приборы на высоких солнечно-синхронных орбитах и наблюдения с низкоорбитальных аппаратов, например с Международной космической станции. При этом происходит постоянное улучшение пространственного разрешения аппаратуры, однако спектральное разрешение изменяется мало. Также наблюдается значительный рост скорости передачи информации. Полученные результаты могут быть использованы при выборе источников данных для мониторинга концентрации малых газовых компонент атмосферы как на больших территориях, так в конкретных регионах России.

Ключевые слова: малые газовые компоненты атмосферы, загрязнители атмосферного воздуха, дистанционное зондирование Земли, спектрометр

Одобрена к печати: 26.08.2024
DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-49-62

Введение

Загрязнение атмосферного воздуха — один из основных факторов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду и здоровье населения. Повышение концентрации различных веществ в атмосфере разрушает озоновый слой Земли, приводит к возникновению кислотных дождей, снижению плодородия почвы, воздействует на дыхательные пути человека, особенно на его лёгкие, вызывает изменение состава крови. Поэтому необходим комплексный мониторинг состояния атмосферы, включающий оценку концентрации определённого вещества в атмосфере.

Среди малых газовых компонент атмосферы выделяется группа газов и примесей — загрязнителей атмосферного воздуха: аэрозоль, диоксиды азота и серы, формальдегид и оксид углерода. Измерение этих загрязнителей имеет большое значение для характеристики экологических и биогеохимических процессов в тропосфере и мониторинга качества воздуха. В последние десятилетия развивается система дистанционных методов получения информации о загрязнении атмосферы, основанная на приборах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), установленных на спутниках. Спутниковое измерение содержания загрязняющих атмосферу газов и примесей очень важно из-за его возможности наблюдать состав атмосферы в разных масштабах: от локального до глобального, что позволяет рассчитывать концентрацию газовых примесей в атмосфере для мониторинга качества воздуха и климатических изменений.

В предыдущие годы было опубликовано несколько обзоров по применению данных ДЗЗ для оценки содержания газовых примесей в атмосфере (Burrows et al., 2011; Martin, 2008; Rahman, 2023). В последующий период достигнут значительный прогресс в разработке нового поколения инструментов. Так, в апреле 2023 г. был выведен на орбиту геостационарный спутник Intelsat-40e с прибором ТЕМПО (*англ.* Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution) (<https://tempo.si.edu>). Также планируется вывод на геостационарную орбиту европейского спутника Sentinel-4 со спектрометром UVN (*англ.* Ultra-violet/Visible/Near-infrared) (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-4/instrumental-payload>). Наряду с разработкой новых приборов также произошло значительное улучшение методов восстановления концентрации примесей в атмосфере и качества валидации спутниковых оценок с учётом наземных измерений.

В Институте космических исследований РАН на базе Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» создана система работы с информацией о концентрации малых газовых составляющих, получаемой на основе данных ДЗЗ. Система позволяет строить мультимедийные композиты изображений на основе исходных данных ДЗЗ с привлечением различной дополнительной информации, например метеорологической. В настоящее время система работает с использованием данных приборов TROPOMI (*англ.* TROPospheric Ozone Monitoring Instrument) (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-5p-tropomi>) и OMI (*англ.* Ozone Monitoring Instrument) (<https://www.knmiprojects.nl/projects/ozone-monitoring-instrument>) (Бриль и др., 2023).

При измерении малых газовых компонент атмосферы с помощью систем спутникового дистанционного зондирования возникают объективные проблемы: малая концентрация изучаемого вещества, сложные методы измерений и аппаратура, переменные условия освещённости земной поверхности и облачности. Для решения этих задач разрабатываются новые приборы, совершенствуются методики восстановления концентрации газов. Цель данной статьи заключается в анализе особенностей пассивных систем измерения малых газовых компонент на разных этапах развития используемой аппаратуры. Такой ретроспективный подход позволяет выявить изменения спектральных, пространственно-временных и технических характеристик приборов по мере совершенствования средств ДЗЗ, а также способствует оптимальному выбору источников информации о загрязнителях атмосферного воздуха как для теоретических исследований, так и для решения прикладных задач.

Спутниковые наблюдения малых газовых компонент атмосферы

В системах спутникового дистанционного зондирования малых газовых компонент атмосферы для измерения радиации используются два типа аппаратуры: активный прибор имеет собственный источник излучения, а пассивный использует излучение Солнца. По принципу съёмки инструменты также делятся на две категории. Приборы, ориентированные в нади́р, обращены непосредственно к поверхности Земли. Приборы, реализующие режим измерения на лимбе (т. е. когда оптическая ось инструмента смотрит не на поверхность, а на край планеты), просвечивают атмосферу. Приборы, ориентированные на лимб, полезны для получения информации о вертикальном распределении газовых компонент и изучения стратосферы. В данном исследовании рассматривается только пассивный метод измерения малых газовых компонент в нади́р.

Основным методом измерения содержания газовых примесей в атмосфере является спектроскопия — физический метод исследования закономерностей взаимодействия электромагнитного излучения с веществом с помощью оптики и детекторов электромагнитного излучения. В дистанционном зондировании метод спектроскопии признан главным инструментом для измерения, оценки, наблюдения и количественного определения газообразных, твёрдых и жидких веществ в различных средах. Спектроскопия широко применяется в различных направлениях исследований, от астрономии до геохимии. Спектроскопические измерения используют особенности поглощения электромагнитного излучения различными

веществами, обусловленные специфическими химическими свойствами (связями), для определения количества и физического состояния обнаруженных веществ. Этот метод широко используется для измерения таких загрязнителей атмосферы, как аэрозоль, диоксиды азота и серы, формальдегид и оксид углерода (рис. 1).

Основной концепцией оценки газовых примесей в атмосфере является измерение отражённого солнечного излучения в ультрафиолетовом, видимом и ближнем инфракрасном диапазоне. Большинство методов спутникового дистанционного зондирования газовых примесей используют принцип ослабления интенсивности солнечного излучения во время прохождения через атмосферу.

В спутниковой спектроскопии принято делить весь доступный для измерения спектральный диапазон на каналы. Обычно каналу соответствует компонента прибора со своей оптикой и детекторами. В качестве примера на рис. 2 показана оптическая схема прибора EMI (англ. Environmental trace gases Monitoring Instrument).

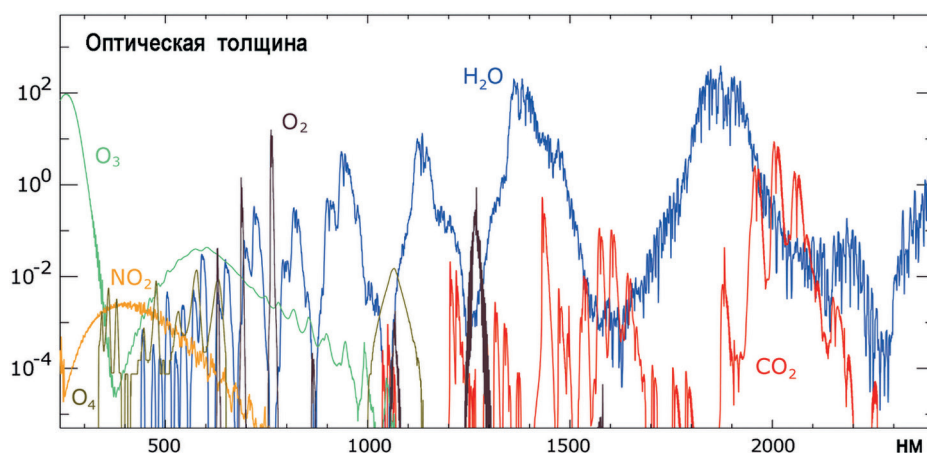


Рис. 1. Спектральное поглощение некоторых оптически активных газов в атмосфере (Burrows et al., 1995)

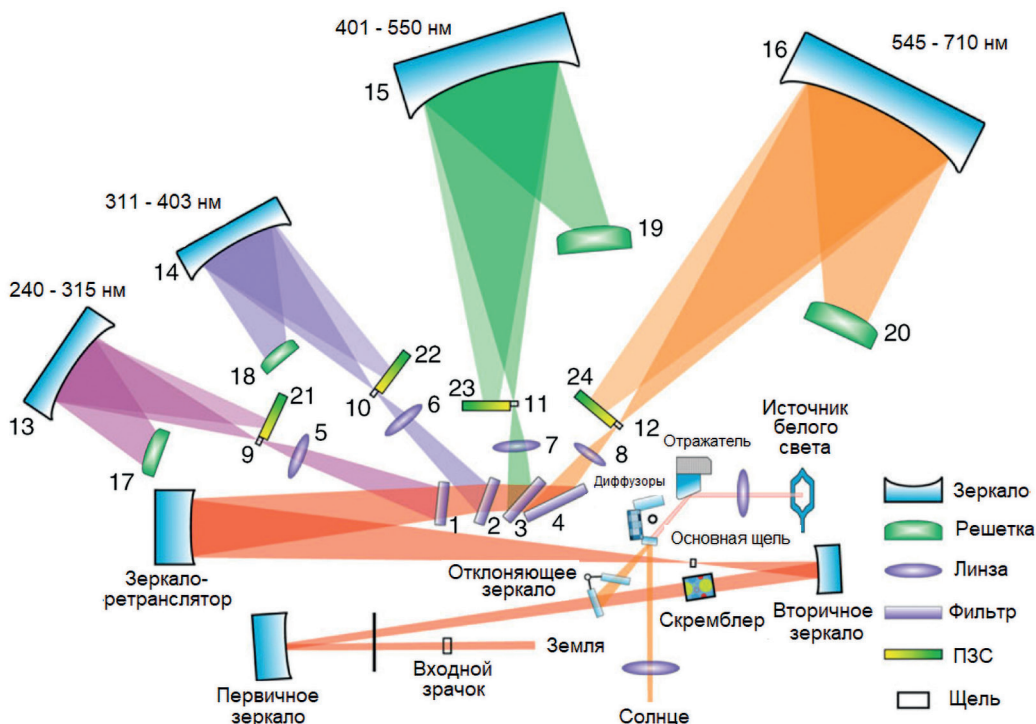


Рис. 2. Оптическая схема прибора EMI (Zhang et al., 2020)

Внутри канала происходит разложение излучения в спектр с помощью дифракционной решётки или призмы и его регистрация с помощью прибора с зарядовой связью — ПЗС-матрицей, по одной из осей которой происходит регистрация пространственной информации, а по другой — спектральной составляющей в каждом пикселе изображения. Геометрия сканирования прибора ЕМІ приведена на *рис. 3*.

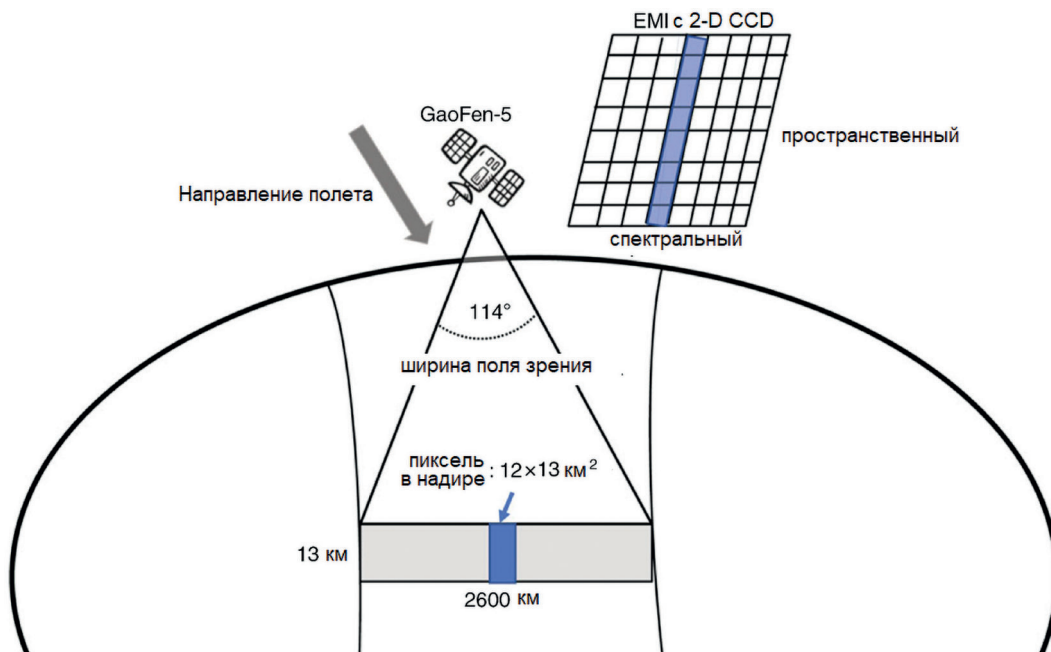


Рис. 3. Геометрия сканирования прибора ЕМІ (<https://tempo.si.edu/overview.html>)

Как видно из *рис. 1*, основными поглотителями в изучаемом диапазоне являются молекулы воды, озона, кислорода и углекислого газа в инфракрасной области. Для восстановления концентрации, например, диоксида азота, необходимо знать как минимум концентрацию водяного пара, озона и кислорода. Так, озон является доминирующим поглотителем при длине волны короче 320 нм, а диоксид азота доминирует в большей части длины волны 350–450 нм, но обычно восстановление концентрации осуществляется в спектральных каналах между 425 и 450 нм (Martin, 2008). Следует упомянуть об особой роли озона в восстановлении концентрации загрязнителей атмосферы. Как будет показано ниже, в название многих приборов входит слово «озон».

Спутники на солнечно-синхронных орбитах

Спектроскопия атмосферы активно развивалась в середине XX в., и с появлением спутников сразу встал вопрос о возможности дистанционного зондирования атмосферы из космоса. В апреле 1970 г. были проведены измерения озона с помощью прибора для измерения обратного рассеяния ультрафиолета (*англ.* Backscatter UltraViolet — BUV). Аппаратура была установлена на борту спутника Nimbus-4. Целью этого эксперимента стало определение как общего содержания озона, так и его распределения в области 25–55 км от максимума концентрации в глобальном масштабе (Krueger et al., 1973). Спектрометр TOMS (*англ.* Total Ozone Mapping Spectrometer) для картирования общего содержания озона был установлен НАСА (Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства США) на спутнике Nimbus-7 и работал с 24 октября 1978 г. до 1 августа 1994 г. Второй прибор TOMS был установлен на отечественном спутнике «Метеор-3» № 5, запущенном 15 августа 1991 г. Прибор работал до декабря 1994 г. и был первым и последним прибором производства

США, установленным на советском спутнике. Полученные в результате съёмок материалы показали высокую перспективность спутникового дистанционного зондирования атмосферы и позволили приступить к модернизации аппаратуры. С этого времени начался устойчивый прогресс в разработке приборов для наблюдения за земной атмосферой с более высоким значением соотношения сигнал/шум, спектральным охватом и разрешением, числом определяемых компонентов атмосферы, а также в разработке алгоритмов восстановления концентрации (Duncan et al., 2014).

В 1995 г. Европейское космическое агентство (ЕКА) запустило спутник ERS-2 (*англ.* European Remote Sensing 2) с прибором GOME (*англ.* Global Ozone Monitoring Experiment) с целью получения глобальных данных содержания озона и малых газовых компонент атмосферных газов (диоксиды азота и серы, формальдегид и оксид брома). Измерения проводились в спектральной области 240–790 нм (Burrows et al., 1999). Дальнейшим развитием этой ветви приборов стал GOME-2 с улучшенными характеристиками по пространственному разрешению и полосе захвата, что значительно повысило оперативность получаемых данных. Инструмент GOME-2 установлен на метеорологических спутниках ЕКА MetOp-A, -B и -C. В настоящее время функционируют спутники MetOp-B и -C (*табл. 1–3*).

Таблица 1. Спектральные характеристики спутниковой аппаратуры для изучения малых газовых компонент

Прибор/спутник	Спектральный диапазон, нм (№ канала)	Спектральное разрешение, нм	Измеряемые компоненты	Период работы
GOME/ERS-2	240–295 (1) 290–405 (2) 400–605 (3) 590–790 (4)	0,22 0,24 0,40 0,40	O ₃ , NO ₂ , O ₂ , O ₄ , H ₂ O, BrO, OClO, SO ₂ , H ₂ CO	апрель 1995 г. – июль 2011 г.
GOME-2/MetOp	240–315 (1) 311–403 (2) 401–600 (3) 590–790 (3)	0,24–0,29 0,26–0,28 0,44–0,53 0,44–0,53	BrO, CHOCHO, H ₂ O, HCHO, NO ₂ , O ₂ , O ₃ , O ₄ , OClO, SO ₂ и аэрозоль	октябрь 2006 г. – наст. время
SCIAMACHY/Envisat	240–314 (1) 309–405 (2) 394–620 (3) 604–805 (4) 785–1050 (5) 1000–1750 (6) 1940–2040 (7) 2265–2380 (8)	0,24 0,26 0,44 0,48 0,54 1,48 0,22 0,26	O ₃ , CO, CH ₄ , N ₂ O, NO ₂ , SO ₂ , HCHO, H ₂ O	март 2002 г. – май 2012 г.
OMI/AURA	264–311 (1) 307–383 (2) 349–504 (3)	0,63 0,42 0,63	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , BrO, HCON OClO, аэрозоль	июль 2004 г. – наст. время
TROPOMI/Sentinel-5P	270–300 (1 UV) 300–320 (2 UV) 320–405 (3 VIS) 405–500 (4 VIS) 675–725 (5 NIR) 725–775 (6 NIR) 2305–2345 (7 SWIR) 2345–2385 (8 SWIR)	0,55 0,55 0,55 0,55 0,55 0,55 0,25 0,25	BrO, CH ₄ , ClO, CO, CO ₂ , H ₂ O, HCHO, N ₂ O, NO, NO ₂ , NO ₃ , O ₂ , O ₃ , O ₄ , OClO, SO ₂ и аэрозоль	октябрь 2017 г. – наст. время
EMI/GaoFen-5	240–315 (UV1) 311–403 (UV2) 401–600 (VI1) 590–790 (VI2)	0,3 0,3 0,3–0,5 0,3–0,5	BrO, ClO H ₂ O, HCHO, NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂	май 2018 г. – наст. время

Примечание: Envisat — *англ.* Environmental satellite, SCIAMACHY — *англ.* SCanning Imaging Absorption spectroMeter for Atmospheric CHartography, SWIR — *англ.* Short Wave Infrared, UV — *англ.* Ultra-Violet, VI — *англ.* VIvisible, NIR — *англ.* Near-InfraRed.

Таблица 2. Пространственно-временные характеристики спутниковой аппаратуры для изучения малых газовых компонент

Прибор/спутник	Угол зрения, град	Поле зрения, км	Разрешение на местности, км	Периодичность съёмки всей поверхности Земли, дни
GOME/ERS-2	64	960	320×40	3
GOME-2/MetOp	80	1920	80×40	1,5
SCIAMACHY/Envisat	64	960	30×60	3
OMI/Aura	114	2600	13×24	1
TROPOMI/Sentinel-5P			3,5×7	
EMI/GaoFen-5			13×48 13×24 (EMI-2)	

Примечание: Указано максимальное разрешение на местности, для продуктов высокого уровня обработки оно, как правило, хуже. Данные для GOME и GOME-2 приведены для режима максимального поля зрения.

Таблица 3. Технические характеристики спутниковой аппаратуры для изучения малых газовых компонент

Прибор/спутник	Масса, кг	Энергопотребление, Вт	Скорость передачи данных, Мбит/с
GOME/ERS-2	50	50	0,04
GOME-2/ MetOp	73	42	0,4
SCIAMACHY/Envisat	198	122	
OMI/Aura	65	66	0,8
TROPOMI/Sentinel-5P	220	170	20
EMI/GaoFen-5	—	—	48

После успешного использования прибора GOME ЕКА приступило к разработке нового спектрометра для зондирования атмосферы. Таким инструментом для измерения концентраций газов в столбе атмосферы стал SCIAMACHY (Bovensmann et al., 1999; Burrows et al., 1995), установленный на борту тяжёлого природоресурсного спутника Envisat (табл. 1–3).

Совместно с Netherlands Agency for Aerospace Programmes (с 2009 г. — Netherlands Space Office) НАСА и Finnish Meteorological Institute в рамках программы EOS (англ. Earth Observing System) разработало прибор OMI для спутника Aura (EOS CH-1) (табл. 1–3). Космический аппарат Aura был запущен 15 июля 2004 г. и продолжит работу предположительно до 2025 г., хотя некоторые приборы уже вышли из строя. Инструмент OMI имеет меньший спектральный диапазон, чем SCIAMACHY, но показывает несколько лучшие результаты по стабильности спектральных каналов и разрешению на местности. Для сравнения: прибор SCIAMACHY весил 215 кг и требовал питания мощностью 140 Вт, тогда как OMI весит 65 кг и его питание составляет 66 Вт.

На следующем этапе развития систем дистанционного зондирования состава атмосферы консорциумом голландских компаний и институтов был разработан прибор TROPOMI. Аппаратура размещена на спутнике ЕКА Sentinel-5P, который был запущен 13 октября 2017 г. Инструмент TROPOMI в основном является наследником SCIAMACHY, он имеет расширенный спектральный диапазон со спектральными каналами в районе 2000 нм (табл. 1). Всего спектрометр проводит измерения в 2600 каналах. Одним из преимуществ прибора TROPOMI стало относительно высокое пространственное разрешение (7×3,5 и 5,5×3,5 км с августа 2019 г.) при частоте глобального покрытия в 1 день.

С 2011 г. NOAA (англ. National Oceanic and Atmospheric Administration) устанавливает на спутниках серии JPSS (англ. Joint Polar Satellite System) — наследников спутников серии

NOAA's POES (*англ.* Polar orbiting Operational Environmental Satellite) — прибор OMPS (*англ.* Ozone Mapping and Profiler Suite), способный вести измерения содержания озона и диоксида серы с разрешением на местности в 50 км. Один из спектрометров прибора, проводящий съёмки в надир, работает в диапазоне 300–420 нм.

Китайское национальное космическое управление CNSA (*англ.* China National Space Administration) в рамках программы CHEOS (*англ.* China High-definition Earth Observation System) 8 мая 2018 г. запустило спутник GaoFen-5, на борту которого находился прибор мониторинга газовых примесей в окружающей среде ЕМІ. Этот прибор был первым китайским спутниковым гиперспектральным спектрометром ультрафиолетового и видимого диапазона (спектральное разрешение <0,6 нм). Наряду с TROPOMI и OMI этот прибор высокого разрешения позволяет вести наблюдения за основными загрязнителями воздуха. Поскольку исходное спектральное разрешение ЕМІ уступает спектральному качеству TROPOMI, не сразу было достигнуто сопоставимое с TROPOMI качество результирующих данных (Liu et al., 2022). Прибор ЕМІ-2 на борту GaoFen-5-02 был запущен в сентябре 2021 г., а модифицированная версия GaoFen-5-01A стартовала в декабре 2022 г. Следует отметить, что прибор ЕМІ имеет 14-битное квантование сигналов, в отличие от 12-битного в спектрометре OMI (Zhao et al., 2021).

Спутники на геостационарных и более высоких орбитах

Солнечно-синхронные спутники в настоящее время могут обеспечить съёмку всей поверхности Земли максимум 1 раз в сутки. Большой частоты съёмки можно добиться только увеличением количества спутников на орбите. Вместе с тем становится актуальным вопрос непрерывного мониторинга загрязнителей приземной атмосферы.

Первым прибором для наблюдения за содержанием газов в тропосфере с высоких орбит стал прибор EPIC (*англ.* Earth Polychromatic Imaging Camera) на борту NOAA DSCOVR (*англ.* Deep Space Climate Observatory) (Haney et al., 2021). Этот спутник, запущенный 11 февраля 2015 г., был установлен на гелиоцентрическую орбиту в точку Лагранжа L_1 . Прибор постоянно ориентирован на Землю, относительно неподвижен и, несмотря на большое расстояние до поверхности (1,5 млн км от Земли), может проводить регулярную съёмку всей поверхности Земли. Прибор EPIC отличается от остальных спектрометров, рассмотренных в данном обзоре, тем, что ведёт наблюдения в 10 узких каналах, а не регистрирует широкий спектр в сотнях и тысячах каналов (*табл. 4*). Для разделения спектральных каналов используется система фильтров, в отличие от дифракционных решёток в других приборах. Пример изображения Земли в «естественных» цветах, полученного с помощью прибора EPIC, показан на *рис. 4* (см. с. 56).

Таблица 4. Спектральные диапазоны прибора EPIC

Длина волны, нм	Ширина канала, нм	Основные компоненты/задачи
317,5±0,1	1±0,2	Озон, SO ₂
325±0,1	2±0,2	Озон, SO ₂
340±0,3	3±0,6	Озон, аэрозоли, SO ₂
388±0,3		Аэрозоли, облака, SO ₂
443±1		Облака, аэрозоли
551±1		Аэрозоли, растительность
680±0,2		Аэрозоли, растительность, облака
687,75±0,2	0,8±0,2	Высота облаков
764±0,2	1±0,2	Высота облаков
779,5±0,3	2±0,4	Облака, растительность



Рис. 4. Изображение Земли и Луны прибором EPIC, полученное 16 июля 2015 г. Поверхность Луны используется для калибровки прибора (https://avdc.gsfc.nasa.gov/pub/DSCOVER/EPIC_NISTAR_Documents/DSCOVER-EPIC-Description.pdf)

Для проведения мониторинга малых газовых компонент с геостационарных орбит подготовлены три проекта: TEMPO, Sentinel-4, GEMS (англ. Geostationary Environmental Monitoring Spectrometer) (рис. 5). Каждый из них будет оснащён спектрометрами для анализа состава тропосферы.

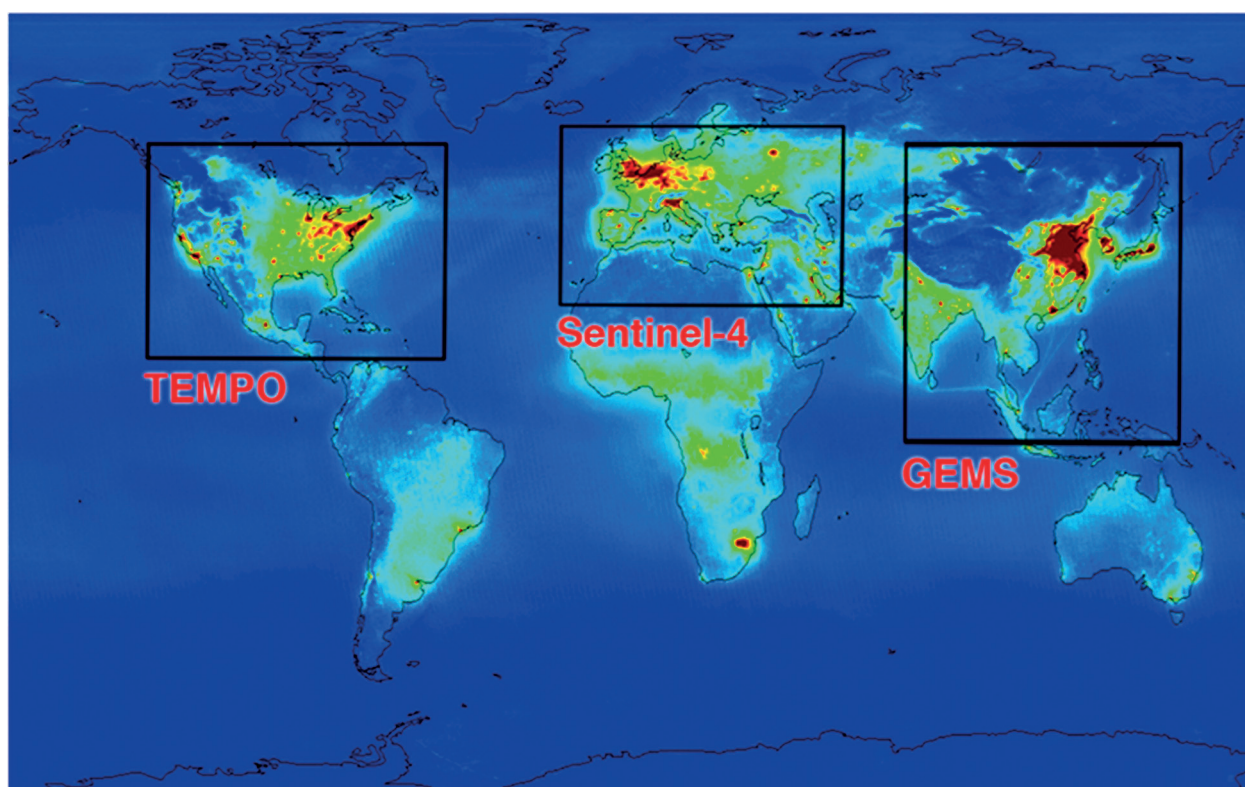


Рис. 5. Поле зрения действующих и планируемых спектрометров на геостационарных спутниках (<https://tempo.si.edu/overview.html>)

Новую эру наблюдений за тропосферными загрязнителями открыл прибор GEMS на борту южнокорейского спутника GEO KOMPSAT-2B (*англ.* Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2B), запущенного 18 февраля 2020 г. и установленного на геостационарную орбиту в точке 128,2° в. д. Прибор впервые позволил вести непрерывные наблюдения за содержанием токсикантов в тропосфере (*табл.* 5–7).

Таблица 5. Спектральные характеристики аппаратуры геостационарных спутников для изучения малых газовых компонентов

Прибор/спутник	Спектральный диапазон, нм (№ канала)	Спектральное разрешение, нм	Измеряемые газы
GEMS/GEO KOMPSAT-2B	300–500 (UV-VIS)	0,6	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , HCHO, CHOCHO, аэрозоль
TEMPO/Intelsat 40e	290–490 (UV) 540–740 (VIS)		O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , HCHO, CHOCHO, аэрозоль
UVN/Sentinel-4	305–500 (UV-VIS) 750–775 (NIR)	0,5 0,12	O ₃ , NO ₂ , SO ₂ , HCHO и аэрозоль

Таблица 6. Примерные пространственно-временные характеристики аппаратуры геостационарных спутников для изучения малых газовых компонентов

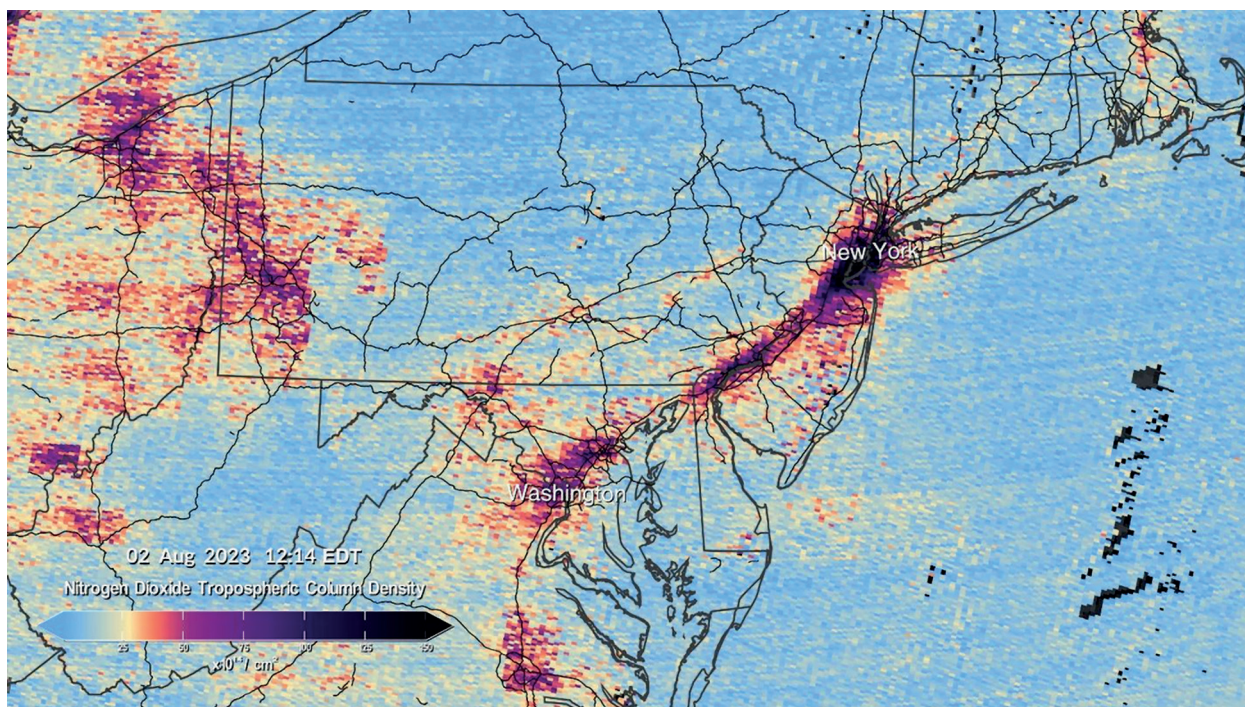
Прибор/спутник	Угол зрения, град	Поле зрения	Разрешение на местности, км	Периодичность съёмки, ч
EPIC/DSCOVR	0,62	Весь диск Земли	8×8 на экваторе	1–1,5
GEMS/GEO KOMPSAT-2B	север–юг: 7,78	5° ю. ш. – 45° с. ш., 75° в. д. – 145° в. д.	3,5×8 на 38° с. ш.	1
TEMPO/Intelsat 40e	5,8 при ориентации на точку 36,5° с. ш., 100° з. д.	18° с. ш. – 58° с. ш. на долготе 100° з. д., 67° з. д. – 125° з. д. на 42° с. ш. 5000×5000 км	2×4,5 около точки 36,5° с. ш., 100° з. д.	
UVN/Sentinel-4	север–юг: 4 восток–запад: 11	30° з. д. – 46,5° в. д. на 40° с. ш., 30° с. ш. – 65° с. ш. 4240×4560 км	8×8 на 45° с. ш.	

Таблица 7. Технические характеристики аппаратуры геостационарных спутников для изучения малых газовых компонентов

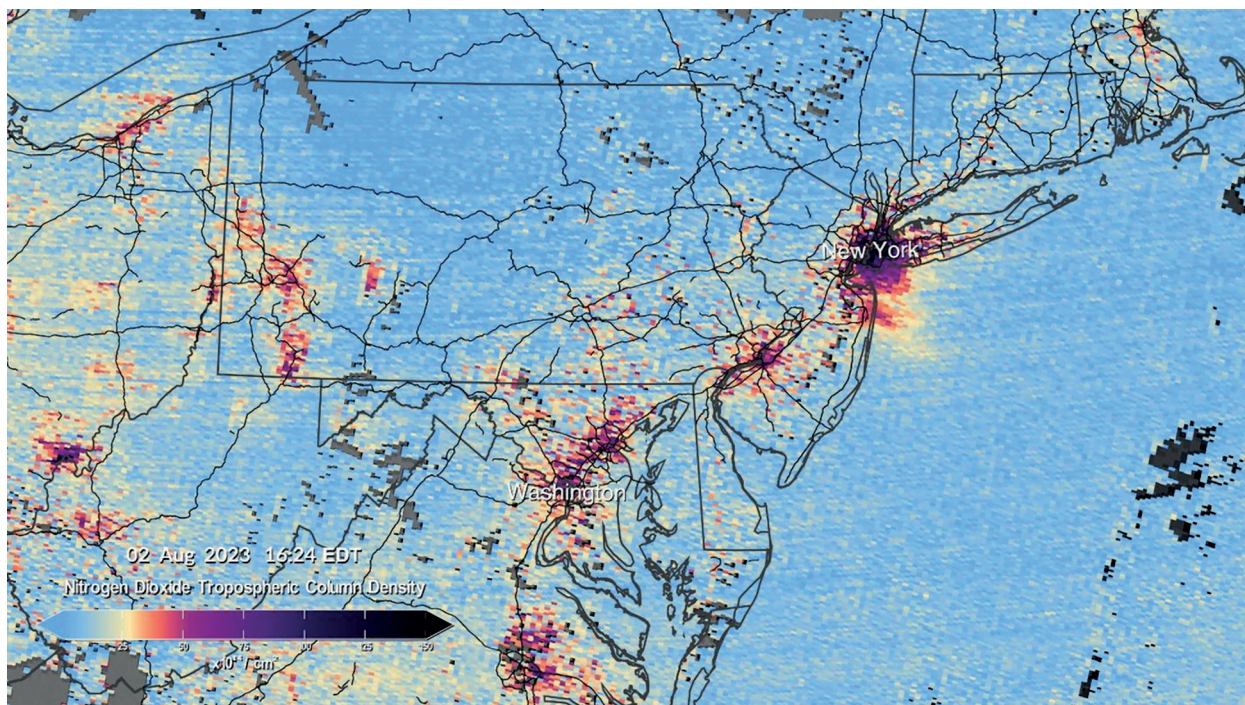
Прибор/спутник	Масса, кг	Энергопотребление, Вт	Скорость передачи данных, Мбит/с
EPIC/DSCOVR	63,2	62	–
GEMS/GEO KOMPSAT-2B	110	200	20
TEMPO/Intelsat 40e	137	132	66
UVN/Sentinel-4	150	100	25

Развитием систем наблюдения за атмосферой с геостационарных орбит стал прибор TEMPO (Tropospheric Emissions: Monitoring of Pollution), установленный на телекоммуникационном спутнике Intelsat 40e. На данный момент этот прибор отличается самым высоким пространственным разрешением для систем наблюдения за составом атмосферы. Запуск произведён 7 апреля 2023 г., спутник выведен на геостационарную орбиту в точке стояния 91° з. д. Одно из первых изображений, полученных от прибора, показано на *рис. 6* (см. с. 58).

В 2025 г. планируется запуск геостационарного спутника Sentinel-4. Одним из приборов на его борту станет S4 UVN Multispectral Spectrometer. Спутник планируется установить на нулевом меридиане. Этот спектрометр позволит вести мониторинг тропосферных загрязнителей в Европе, на Ближнем Востоке и в Северной Африке.



а



б

Рис. 6. Сравнение тропосферного содержания диоксида азота на восточном побережье США 2 августа 2023 г. по данным прибора TEMPO: а — в 12:14 EST (англ. Eastern Standard Time — североамериканское восточное стандартное время); б — в 16:24 EST (<https://svs.gsfc.nasa.gov/5142/>)

Приборы на пилотируемых космических станциях и межпланетных миссиях

Важные эксперименты по разработке систем наблюдения за атмосферой проводились на пилотируемых космических станциях. Под руководством академика К. Я. Кондратьева и профессора А. А. Бузникова на кафедре физики атмосферы Ленинградского государственного университета, а затем и в Особом конструкторском бюро аэрокосмической аппаратуры «Интеграл» был разработан ряд космических спектрометров. Измеренные спектры сумеречной и дневной атмосферы позволили получить данные о вертикальном распределении в стратосфере и мезосфере оптически активных компонент (аэрозоля, озона, водяного пара и др.) и оценить влияние антропогенных факторов на состояние верхней атмосферы Земли (Бузников, 2020).

В Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН) был разработан и апробирован на борту Международной космической станции спектрометр «РУСАЛКА» (Ручной Спектральный Анализатор Компонент Атмосферы) для определения концентрации метана и углекислого газа в атмосфере Земли в тепловом инфракрасном диапазоне. Дальнейшим развитием этого направления стал прибор «Дриада» (Трохимовский и др., 2022). В 2022 г. на Международную космическую станцию был доставлен прибор NASA EMIT (*англ.* Earth Surface Mineral Dust Source Investigation), представляющий собой спектрометр для изучения минерального состава земной поверхности в диапазоне 400–2500 нм с разрешением на местности в 60 м (Green et al., 2020). Прибор оказался пригоден для восстановления концентрации некоторых газов. Так, например, на *рис. 7* показаны облака рассеяния метана от газовых скважин в Туркмении. Шлейфы были обнаружены прибором EMIT, некоторые из них простираются на расстояние более 32 км.

В ИКИ РАН проводятся исследования состава атмосферы планет Солнечной системы. Наиболее удачным примером в этой области было участие российских учёных в миссии «ЭкзоМарс-2016». В апреле 2018 г. на борту космического аппарата «ЭкзоМарс-2016» начал работу созданный в ИКИ РАН спектроскопический комплекс АЦС (*англ.* ACS — Atmospheric Chemistry Suite) для исследования атмосферы Марса. Три инфракрасных спектрометра регистрируют излучение в диапазоне от 700 до 17000 нм. Их рекордные характеристики позволяют проводить мониторинг климата Марса и поиск малых газовых составляющих с высокой точностью (Korablev et al., 2019).

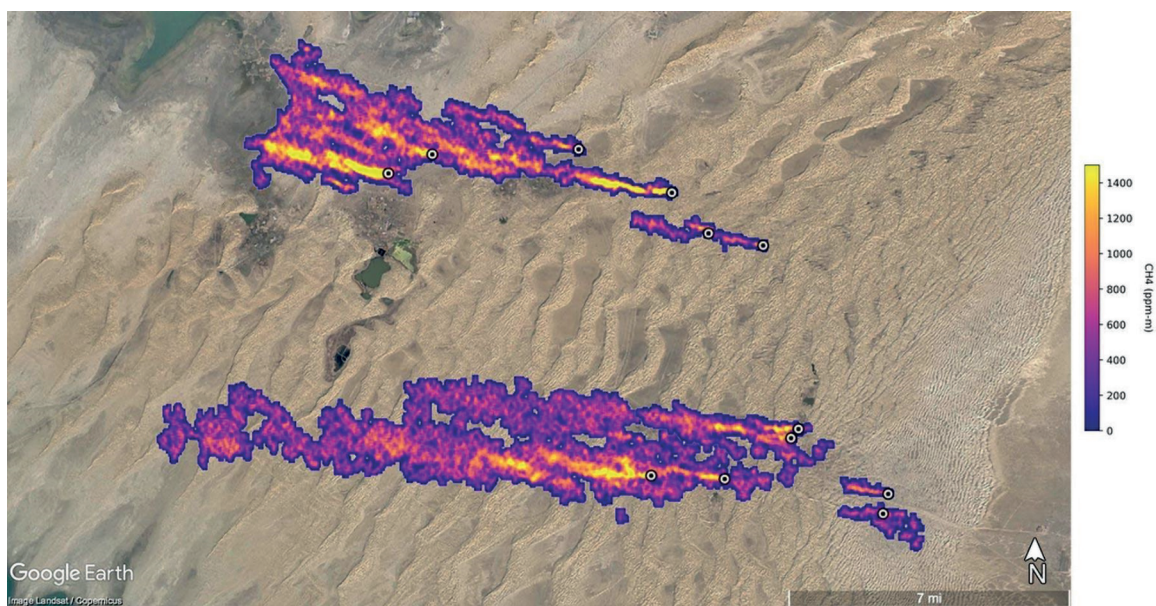


Рис. 7. Метановые выбросы от скважин к востоку от г. Хазар (*ранее* Челекен), Туркмения (<https://www.nasa.gov/centers-and-facilities/jpl/methane-super-emitters-mapped-by-nasas-new-earth-space-mission/>)

Заключение

Системы спутникового дистанционного зондирования малых газовых компонент атмосферы — загрязнителей атмосферного воздуха — получили широкое распространение в практике дистанционного зондирования Земли. Они используются как в исследовательских проектах, так и в оперативной работе. Выполненный в статье анализ пассивных систем, позволяющих дистанционно определять концентрацию малых газовых компонент атмосферы, показал, что в настоящее время наметился тренд на построение трёхуровневой системы наблюдений, характерной и для других областей дистанционного зондирования Земли. Эта система включает геостационарные спутники, приборы на высоких солнечно-синхронных орбитах и наблюдения с низкоорбитальных аппаратов (Международная космическая станция). Отмечается постоянный рост пространственного разрешения аппаратуры для дистанционного зондирования малых газовых компонент. При этом спектральное разрешение приборов изменяется мало, массогабаритные и энергетические характеристики аппаратуры также остаются относительно постоянными. Однако наблюдается значительный рост скорости передачи информации. Таким образом, достижения современной техники позволяют создавать достаточно универсальные спектрометры в области ультрафиолетового, видимого и ближнего инфракрасного диапазона, пригодные как для анализа малых газовых компонент атмосферы, так и для определения минерального состава земной поверхности. Результаты анализа систем спутникового дистанционного зондирования, представленные в данной статье, могут быть использованы при выборе источников данных, наиболее соответствующих решению конкретных задач по мониторингу концентрации малых газовых компонент атмосферы как на больших территориях, так в отдельных регионах РФ.

Исследование профинансировано грантом Российского научного фонда № 24-27-00156, <https://rscf.ru/project/24-27-00156/>.

Литература

1. Бриль А. А., Константинова А. М., Лупян Е. А., Бурцев М. А. Возможности работы ЦКП «ИКИ-Мониторинг» с информацией о малых газовых составляющих, получаемой на основе данных спутникового мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 85–95. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
2. Бузников А. А. Академик К. Я. Кондратьев — выдающийся ученый и организатор науки // Всероссийская науч. конф. с международным участием «Земля и космос» к столетию академика РАН К. Я. Кондратьева: сб. ст. Санкт-Петербург: ООО «Мономакс», 2020. С. 4–13.
3. Трохимовский А. Ю., Кораблев О. И., Иванов Ю. С. и др. Инфракрасный канал научной аппаратуры «Дриада» для измерения содержания парниковых газов из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 6. С. 50–60. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60.
4. Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M. et al. SCIAMACHY — Mission objectives and measurement modes // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56(2). P. 127–150. DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2.
5. Burrows J. P., Hölzle E., Goede A. P. H. et al. SCIAMACHY — Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Chartography // Acta Astronautica. 1995. V. 35. No. 7. P. 445–451. [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(94\)00278-T](https://doi.org/10.1016/0094-5765(94)00278-T).
6. Burrows J. P., Weber M., Buchwitz M. et al. The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission, instrument concept, and first scientific results // J. Atmospheric Sciences. 1999. V. 56(2). P. 151–175. DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0151:TGOMEG>2.0.CO;2.
7. Burrows J., Borrell P., Platt U. The remote sensing of tropospheric composition from space. Verlag, Heidelberg: Springer, 2011. 532 p. DOI: 10.1007/978-3-642-14791-3.
8. Duncan B. N., Prados A. I., Lamsal L. N. et al. Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid // Atmospheric Environment. 2014. V. 94. P. 647–662. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.05.061.

9. Green R., Mahowald N., Ung Ch. et al. The Earth surface mineral dust source investigation: An Earth science imaging spectroscopy mission // 2020 IEEE Aerospace Conf. 2020. P. 1–15. DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172731.
10. Haney C., Doelling D. R., Su W. et al. Radiometric Stability Assessment of the DSCOVR EPIC Visible Bands Using MODIS, VIIRS, and Invariant Targets as Independent References // *Frontiers in Remote Sensing*. 2021. V. 2. Article 16. <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.765913>.
11. Korablev O., Vandaele A. C., Montmessin F. et al. No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations // *Nature*. 2019. V. 568(7753). P. 517–520. DOI: 10.1038/s41586-019-1096-4.
12. Krueger A. J., Heath D. F., Mateer C. L. Variations in the stratospheric ozone field inferred from Nimbus satellite observations // *Pure Applied Geophysics*. 1973. V. 106. P. 1254–1263. DOI: 10.1007/BF00881077.
13. Liu C., Hu Q., Zhang C. et al. First Chinese ultraviolet–visible hyperspectral satellite instrument implicating global air quality during the COVID-19 pandemic in early 2020 // *Light: Science and Applications*. 2022. V. 11. Article 28. <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00722-x>.
14. Martin R. V. Satellite remote sensing of surface air quality // *Atmospheric Environment*. 2008. V. 42. P. 7823–7843. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.018.
15. Rahman M. M. Recommendations on the measurement techniques of atmospheric pollutants from in situ and satellite observations: a review // *Arabian J. Geosciences*. 2023. V. 16. Article 326. DOI: 10.1007/s12517-023-11410-4.
16. Zhang C., Liu C., Chan K. L. et al. First observation of tropospheric nitrogen dioxide from the Environmental Trace Gases Monitoring Instrument onboard the GaoFen-5 satellite // *Light: Science and Applications*. 2020. V. 9. Article 66. <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0306-z>.
17. Zhao M., Si F., Zhou H. et al. Pre-launch radiometric characterization of EMI-2 on the GaoFen-5 series of satellites // *Remote Sensing*. 2021. V. 13. Article 2843. <https://doi.org/10.3390/rs13142843>.

Satellite remote sensing systems for trace gas components of the atmosphere

A. A. Tronin, G. M. Nerobelov, M. P. Vasiliev

Saint Petersburg Federal Research Center RAS, Saint Petersburg 197178, Russia
E-mail: a.a.tronin@ecosafety-spb.ru

Among the small gas components of the atmosphere, a group of gases and impurities stands out — atmospheric air pollutants: aerosol, nitrogen and sulfur dioxides, formaldehyde and carbon monoxide. Measurement of these pollutants is very important for characterizing environmental and biogeochemical processes in the troposphere and monitoring air quality. In recent decades, a system of remote methods for obtaining information on atmospheric pollution has been being developed on the basis of Earth remote sensing instruments. The review examines the state of technical means of remote sensing for measuring trace gas components of the troposphere. The development of equipment installed on sun-synchronous and geostationary satellites is analyzed and the spectral, spatiotemporal and technical characteristics of the devices are given. The analysis shows that there is currently a trend towards building a three-level observation system, including geostationary satellites, instruments in high sun-synchronous orbits and observations from low-orbiting vehicles, e.g. International Space Station. At the same time, there is a constant increase in spatial resolution of the equipment, but spectral resolution changes little. There is also a significant increase in the speed of information transfer. The results obtained can be used when selecting data sources for monitoring the concentrations of trace gas components of the atmosphere both over large areas and in specific regions of Russia.

Keywords: trace gas components of the atmosphere, atmospheric air pollutants, remote sensing of the Earth, spectrometer

Accepted: 26.08.2024

DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-5-49-62

References

1. Bril A. A., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Burtsev M. A., Capabilities of IKI-Monitoring shared use center operation with satellite monitoring — based trace gas component data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, Vol. 20, No. 5, pp. 85–95, DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-85-95.
2. Buznikov A. A., Academician K. Ya. Kondratiev — outstanding scientist and organizer, *Proc. All-Russian scientific conference with international participation “Earth and Space” for the centenary of Academician of the Russian Academy of Sciences K. Ya. Kondratiev*, Saint Petersburg: LLC “Monomax”, 2020, pp. 4–13.
3. Trokhimovsky A. Yu., Korablev O. I., Ivanov Yu. S. et al., Infrared channel of the triada spectrometer for greenhouse gases measurement from space, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 6, pp. 50–60, DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-6-50-60.
4. Bovensmann H., Burrows J. P., Buchwitz M. et al., SCIAMACHY — Mission objectives and measurement modes, *J. Atmospheric Sciences*, 1999, Vol. 56(2), pp. 127–150, DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2.
5. Burrows J. P., Hölzle E., Goede A. P. H. et al., SCIAMACHY — Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography, *Acta Astronautica*, 1995, Vol. 35, No. 7, pp. 445–541, [https://doi.org/10.1016/0094-5765\(94\)00278-T](https://doi.org/10.1016/0094-5765(94)00278-T).
6. Burrows J. P., Weber M., Buchwitz M. et al., The Global Ozone Monitoring Experiment (GOME): Mission, instrument concept, and first scientific results, *J. Atmospheric Sciences*, 1999, Vol. 56(2), pp. 151–175, DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0151:TGOMEG>2.0.CO;2.
7. Burrows J., Borrell P., Platt U., *The Remote sensing of tropospheric composition from space*, Verlag, Heidelberg: Springer, 2011, 532 p., DOI: 10.1007/978-3-642-14791-3.
8. Duncan B. N., Prados A. I., Lamsal L. N. et al., Satellite data of atmospheric pollution for U.S. air quality applications: Examples of applications, summary of data end-user resources, answers to FAQs, and common mistakes to avoid, *Atmospheric Environment*, 2014, Vol. 94, pp. 647–662, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2014.05.061.
9. Green R., Mahowald N., Ung Ch. et al., The Earth surface mineral dust source investigation: An Earth science imaging spectroscopy mission, *2020 IEEE Aerospace Conference*, 2020, pp. 1–15, DOI: 10.1109/AERO47225.2020.9172731.
10. Haney C., Doelling D. R., Su W. et al., Radiometric Stability Assessment of the DSCOVR EPIC Visible Bands Using MODIS, VIIRS, and Invariant Targets as Independent References, *Frontiers in Remote Sensing*, 2021, Vol. 2, Article 16, <https://doi.org/10.3389/frsen.2021.765913>.
11. Korablev O., Vandaele A. C., Montmessin F. et al., No detection of methane on Mars from early ExoMars Trace Gas Orbiter observations, *Nature*, 2019, V. 568(7753), pp. 517–520, DOI: 10.1038/s41586-019-1096-4.
12. Krueger A. J., Heath D. F., Mateer C. L., Variations in the stratospheric ozone field inferred from Nimbus satellite observations, *Pure Applied Geophysics*, 1973, Vol. 106, pp. 1254–1263, DOI: 10.1007/BF00881077.
13. Liu C., Hu Q., Zhang C. et al., First Chinese ultraviolet–visible hyperspectral satellite instrument implicating global air quality during the COVID-19 pandemic in early 2020, *Light: Science and Applications*, 2022, Vol. 11, Article 28, <https://doi.org/10.1038/s41377-022-00722-x>.
14. Martin R. V., Satellite remote sensing of surface air quality, *Atmospheric Environment*, 2008, Vol. 42, pp. 7823–7843, DOI: 10.1016/j.atmosenv.2008.07.018.
15. Rahman M. M., Recommendations on the measurement techniques of atmospheric pollutants from in situ and satellite observations: a review, *Arabian J. Geosciences*, 2023, Vol. 16, Article 326, DOI: 10.1007/s12517-023-11410-4.
16. Zhang C., Liu C., Chan K. L. et al., First observation of tropospheric nitrogen dioxide from the Environmental Trace Gases Monitoring Instrument onboard the GaoFen-5 satellite, *Light: Science and Applications*, 2020, Vol. 9, Article 66, <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0306-z>.
17. Zhao M., Si F., Zhou H. et al., Pre-launch radiometric characterization of EMI-2 on the GaoFen-5 series of satellites, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, Article 2843, <https://doi.org/10.3390/rs13142843>.